

## **REVISIÓN GENERAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICIÓN EN PELÍCULA EN PISCINA**

R. Arévalo\*, L. Rebollo°, A. Abánades°, J. Muñoz°, R. Omaña\*, O. Pérez\*

\* Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), Táchira, Venezuela

° Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España

\*e-mail: rarevalo@unet.edu.ve

### **RESUMEN**

La ebullición en película es el mecanismo de transferencia de calor básico que acopla térmicamente un líquido, saturado o subenfriado, y una superficie caliente cuando existe una gran diferencia de temperatura entre ambos. Dicho mecanismo presenta la complejidad física asociada a la existencia de una capa límite convectiva de vapor en torno a la superficie caliente, así como al acoplamiento térmico radiante entre la superficie y los dos medios participativos que la rodean (vapor y líquido). Este mecanismo tiene aplicaciones tecnológicas de interés en propulsión aeroespacial, en sistemas criogénicos, en procesos industriales metalúrgicos, y en otras áreas de la Ingeniería en donde existe la necesidad de enfriar mediante ebullición superficies a alta temperatura. Por otra parte, la refrigeración por ebullición en película es un mecanismo que resulta de importancia esencial en el análisis de la seguridad de procesos industriales en los que sea previsible la interacción de agua y materiales fundidos, entre los que cabe destacar el caso de los reactores nucleares ante escenarios de riesgo en los que el acoplamiento térmico convectivo-radiante entre el combustible nuclear y el refrigerante, e incluso entre la superficie exterior de la vasija y el refrigerante, garantiza el cumplimiento de los criterios de aceptación en caso de fallo mecánico importante del sistema de refrigeración del reactor. En el presente trabajo, y para identificar el marco en que UNET-UPM desarrollará sus investigaciones sobre ebullición en película en piscina en torno a esferas, se realiza una revisión de los estudios más relevantes desarrollados en esta temática, en la que las primeras investigaciones teóricas y experimentales, de tipo fundamental, se remontan al periodo 1950-65 en que se desarrollaron los primeros proyectos de navegación espacial, y se diseñaron y construyeron los primeros reactores nucleares de aplicación comercial, promoviéndose posteriormente numerosas investigaciones que aportaron correlaciones "ad-hoc" de aplicación restringida a ciertas tecnologías, así como otras de propósito general, de menor precisión pero con mayor soporte teórico.

**PALABRAS CLAVES:** transferencia de calor, ebullición, película, piscina, correlación

## INTRODUCCIÓN

La ebullición es el proceso de evaporación de un líquido debido al calor aportado por una superficie sólida (o por una interfase líquida) que se encuentre a una temperatura superior a la de saturación. De acuerdo a la diferencia entre la temperatura de esta superficie y la temperatura de saturación del líquido, la ebullición puede clasificarse en tres grupos: nucleada, transición y película. La más común y estudiada es la ebullición nucleada, ya que en ella se obtienen los mayores valores del coeficiente de transferencia de calor y, por tanto los mayores flujos caloríficos, con una temperatura de la superficie calefactora ligeramente superior a la de saturación. Por esto, es deseable que aquellos sistemas en los que se transfiere calor por ebullición operen en el régimen nucleado. Sin embargo, la ebullición en película tiene también aplicaciones de interés tecnológico, por ser el resultado de la existencia previa de un gran salto térmico entre una superficie calefactora y un fluido refrigerante, como son las asociadas a la operación de sistemas criogénicos, a procesos térmicos en industrias metalúrgicas, a procesos de propulsión en el campo aeroespacial, y a procesos de refrigeración de emergencia para garantizar la seguridad operativa de los reactores nucleares.

En la ebullición en película, se forma una película completa de vapor entre la superficie caliente y el líquido, la cual impide que este último contacte directamente con la superficie caliente. Este régimen de ebullición solo ocurre cuando existe una gran diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el líquido en ebullición, y los mecanismos de transferencia de calor que predominan son la conducción y la radiación a través de la película de vapor. La baja conductividad del vapor provoca valores bajos del coeficiente de transferencia de calor, si bien la contribución de la transferencia de calor por radiación es más alta a medida que crece la diferencia de temperatura.

A temperaturas superficiales moderadas, en que existe solo transferencia de calor por convección, por resultar despreciable la componente radiante, los materiales, propiedades y condiciones superficiales de la superficie calefactora no afectan significativamente a la ebullición en película; sin embargo, cuando la componente radiante es importante ocurre lo contrario, ya que la emisividad de la superficie depende del material y de la temperatura y condición de la superficie.

La mayor parte de las investigaciones realizadas sobre ebullición en película han utilizado superficies planas, cilíndricas o esféricas. De acuerdo a la condición del líquido, la ebullición en película puede ser clasificada en saturada o subenfriada. En el caso de la ebullición saturada, la mayor parte del calor transferido a través de la película de vapor es usado en la evaporación del líquido. Este vapor generado no condensa, por encontrarse el líquido en condiciones de saturación. Por otra parte, en el caso de ebullición en película de líquido subenfriado, la mayor parte del calor transferido a través de la película lo hace por convección libre hacia el líquido, empleándose como calor sensible, y solo una parte llega a ser fuente de calor para la evaporación neta, empleándose como calor latente. Una parte de las burbujas de vapor formadas por evaporación de líquido en la interfase se incorporan a la película de vapor y migran por empuje hacia la superficie libre, en tanto que las restantes burbujas se separan de la interfase penetrando en la zona de líquido subenfriado, en donde condensan muy rápidamente, cediendo su calor latente que pasa a emplearse en el líquido como calor sensible, y desapareciendo a continuación después de un corto recorrido en el seno del líquido.

En función de la condición cinética del líquido, la ebullición en película también puede clasificarse en ebullición en piscina (movimiento por convección natural) y ebullición con convección forzada (movimiento por empuje forzado). Como umbral de separación de ambos regímenes, ciertas investigaciones experimentales indican que cuando la raíz cuadrada del número de Froude es menor que 2, la velocidad forzada del líquido no afecta a la transferencia de calor, por lo que tal valor sirve de criterio para distinguir entre ambos modos de ebullición en película.

El presente trabajo se ha desarrollado para identificar el marco en que UNET-UPM deba realizar sus investigaciones sobre ebullición en película en piscina en torno a esferas.

## PRIMEROS ESTUDIOS DE EBULLICIÓN EN PELÍCULA

Para 1827, Perkins argumentó que varias explosiones misteriosas de calderas eran el resultado del impacto mecánico producido en los tubos por el sobrecalentamiento derivado de operar en modo ebullición en película, como consecuencia de un diseño deficiente con excesivo aporte térmico por llamas y humos calientes sobre el haz de tubos en la caldera, cuestión que fue luego confirmada por los estudios experimentales de Boutigny (1843-1850).

Le Chatelier en 1904 realizó experimentos en los cuales sumergía una masa sólida muy caliente en una piscina de líquido, registrando la temperatura en un período de tiempo. Las curvas temperatura-tiempo mostraron claramente, a través de una serie de puntos de inflexión, los sucesivos regímenes de ebullición en película, en transición, y nucleada, así como la transferencia de calor final por convección natural.

Para 1934 se realizarían los experimentos que revolucionarían la investigación en transferencia de calor por ebullición. Fue entonces cuando Nukiyama [3], por medio de sus experimentos con un calentador de platino en forma de alambre, y empleando agua como fluido en ebullición, mostró que la cantidad de calor transferida por ebullición no evolucionaba establemente con respecto a la diferencia de temperatura entre el alambre y el agua, sino que existían al menos un máximo y un mínimo. Así, existe un primer tramo ascendente (ebullición nucleada), un segundo tramo descendente (ebullición en transición) y un tercer tramo también ascendente (ebullición en película), cada uno con fenomenología diferente. En resumen, este trabajo lideró la diferenciación definitiva entre los tres regímenes de ebullición.

## CORRELACIONES PARA EBULLICIÓN EN PELÍCULA EN PISCINA

El primer estudio sistemático, teórico y experimental, de la transmisión de calor por ebullición en película saturada fue realizado por Bromley en 1950 [4]. Usando un modelo teórico simple en el que se asume que el vapor generado fluye laminarmente en una capa anular de vapor alrededor de un cilindro horizontal, presentó una correlación para cilindros horizontales en una piscina de líquido, incluyendo la contribución de la radiación térmica. Su análisis dio la siguiente expresión para el coeficiente puramente convectivo de transferencia de calor:

$$Nu = \frac{hD}{k_v} = C \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (1)$$

donde el número de Arquímedes,  $Ar$ , y el sobrecalentamiento adimensional modificado,  $Sp'$ , vienen dados por:

$$Ar = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D^3}{\rho_v \nu_v^2} \quad (2)$$

$$Sp' = \frac{\Delta T_{sob} C_{p,v}}{h'_{fg} Pr_v} \quad (3)$$

siendo  $h'_{fg} = h_{fg} + 0.5C_{p,v}\Delta T_{sob}$  la entalpía de vaporización modificada para tomar en cuenta que el vapor de la película no está saturado sino que tiene un perfil de temperaturas que se extiende desde la de saturación (en la interfase), hasta la correspondiente a la superficie calefactora, al contactar con ella.

De acuerdo a sus experimentos, realizados en ebullición en película en piscina, en condiciones estables, con cilindros de grafito (diámetros entre 9.8 y 16.2 mm) calentados eléctricamente y con 7 fluidos diferentes, concluyó que la constante  $C$  no varía significativamente y sugirió un valor de 0.62.

En 1953, Banchoff contribuyó en el entendimiento de la ebullición en película. Usando varios fluidos, cuantificó los efectos del diámetro del cilindro sobre el coeficiente de transferencia de calor. Este estudio concluye que la correlación de Bromley es válida solamente para un rango estrecho de diámetros y recomendó una modificación empírica a la misma de la siguiente forma:

$$Nu = a \left( \frac{1}{D} + C \right) D^{1/4} \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (4)$$

donde el término “ $a$ ” es presumiblemente constante ( $a = 0.045 \text{ in-ft}^{-0.25}$ ) para una variedad de líquidos y  $C$  es 9.5, 36.5 y  $84 \text{ in}^{-1}$  para n-pentano, oxígeno y agua, respectivamente, a presión atmosférica. Esta correlación evita que el coeficiente de transferencia de calor tienda a cero cuando el diámetro tiende a infinito, pero tiene la desventaja de que la constante  $C$  depende de la clase de líquido en ebullición, por lo que no es una constante de propósito general.

Varios años más tarde, Berenson (1961) aplicó la teoría de la inestabilidad hidrodinámica de Taylor-Helmholtz para su análisis de ebullición en película en piscina en torno a una gran superficie horizontal, encontrando la siguiente correlación:

$$Nu = \frac{h\lambda_c}{k_v} = 0.672 \left( \frac{Ar_{\lambda_c}}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (5)$$

donde  $\lambda_c$  es la longitud de onda crítica respecto a la inestabilidad hidrodinámica de la interfase vapor-líquido, y viene dada por:

$$\lambda_c = 2\pi L \quad L = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g}} \quad (6, 7)$$

siendo  $L$  la longitud característica del domo de la película de vapor.

Esta correlación es similar a la de Bromley para cilindros horizontales, diferenciándose por la incorporación de  $\lambda_c$  en sustitución del diámetro del cilindro.

Este mismo año, Tachibana y Fukui reportan el primer trabajo sobre ebullición en película en piscina subenfriada. Ellos estudiaron, teórica y experimentalmente, este fenómeno en torno a alambres finos hechos de aleaciones de níquel-cromo con diámetros entre 0.5-0.8 mm, usando tres fluidos diferentes y un rango de subenfriamiento entre 0 y 45°C, a presión atmosférica. No generaron ninguna correlación.

Un año después, en 1962, Breen y Westwater hicieron otro aporte significativo al entendimiento del efecto del diámetro sobre la ebullición en película en piscina en torno a cilindros horizontales. Introduciendo la longitud de onda crítica  $\lambda_c$ , correlacionaron todos los datos disponibles para ebullición en película en piscina para cilindros horizontales por medio de la ecuación empírica simple mostrada a continuación. Esta demuestra, nuevamente, que la correlación de Bromley es válida sólo para un pequeño rango de diámetros.

$$Nu = \left( 0.59 + 0.069 \frac{\lambda_c}{D} \right) \left( \frac{D}{\lambda_c} \right)^{1/4} \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (8)$$

Utilizaron datos de 10 fluidos distintos, diámetros de cilindros hasta de 4.6 cm y temperaturas superficiales entre 301 y 1703 K.

Frederking y Clark (1963) fueron los primeros en reportar una solución analítica para la ebullición en película en piscina en torno a esferas. Mediante un análisis similar al usado por Bromley, reportaron la siguiente correlación:

$$Nu = 0.586 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (9)$$

Sin embargo, debido a que los coeficientes de transferencia de calor de sus experimentos resultaron ser independientes del diámetro de la esfera ensayada, y su ecuación no se ajustaba a los mismos, obtuvieron luego una correlación empírica a través de sus datos por medio de la ley de potencia  $1/3$  de la siguiente forma:

$$Nu = 0.14 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/3} \quad (10)$$

En 1967, Baumeister y Hamill [5] desarrollaron un modelo teórico para ebullición en película en piscina en torno a alambres horizontales de pequeño diámetro, el cual siguió la tendencia de los datos experimentales y tuvo una excelente concordancia con la correlación de Breen y Westwater. Ellos sugirieron la siguiente correlación:

$$Nu = 0.373 \left\{ \left( \frac{D}{L} \right) \left[ 1 + \frac{9}{\sqrt{6}} \frac{L}{D} + \frac{8}{3\sqrt{6}} \left( \frac{L}{D} \right)^3 \right] \right\} \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} \quad (11)$$

Estos mismos autores en este trabajo también hicieron un análisis teórico de la ebullición en película en torno a una placa horizontal con subenfriamiento y radiación significativa. El análisis estuvo basado en el postulado de la máxima velocidad de producción de entropía. La solución general permite calcular el coeficiente total de transferencia de calor a través de la suma (ley de adición) del coeficiente convectivo para ebullición en película saturada,  $h_{sat}$ , el coeficiente de transferencia de calor por radiación,  $h_r$ , y el término de contribución al incremento de la transmisión de calor debido al subenfriamiento,  $h_{nc}$ . De esta manera:

$$h_t = h_{sat} + 0.88h_r + 0.12h_{nc} \frac{\Delta T_{sub}}{\Delta T_{sob}} \quad (12)$$

donde  $h_{nc}$  y  $h_r$  están dados por:

$$h_{nc} = \frac{q_{nc}}{\Delta T_{sub}} \quad h_r = \frac{\varepsilon \sigma_B (T_s^4 - T_{sat}^4)}{\Delta T_{sob}} \quad (13, 14)$$

Bradfield (1967), estudió experimentalmente el efecto del subenfriamiento sobre la ebullición en película en torno a una esfera de cobre puro de 59 mm de diámetro y obtuvo las curvas de flujo calorífico en función del tiempo, para enfriamientos transitorios en agua a temperaturas de 95, 53 y 27°C, a presión atmosférica. El estudio muestra un fuerte efecto del subenfriamiento.

Siguiendo la misma idea de la investigación de Baumeister y Hamill, Hendricks y Baumeister en 1969 [6] elaboraron un modelo teórico para esferas. Ellos caracterizaron el tamaño del domo de vapor a través de la longitud de onda crítica y aplicaron también el principio de máxima velocidad de generación de entropía. Su correlación está dada por:

$$Nu = 2 + \frac{1}{4} \left[ -\frac{2}{3} \frac{Ar}{Sp} G(Bo) \right] + \left\{ 0.177 \left( \frac{Ar}{Sp} \sqrt{Bo} \right)^{1/4} + \csc[\theta^*(Bo)] \right\} \left\{ 1 + \cos[\theta^*(Bo)] \right\} \quad (15)$$

donde Bo es el número de Bond,  $Bo = (D/L)^2$ , y  $\Theta^*(Bo)$  y  $G(Bo)$  son funciones del número de Bond dados en forma gráfica. Esta correlación fue verificada con datos experimentales con esferas pequeñas entre 0.397 y 12.7 mm de diámetro por estos mismos autores en 1970.

Siviour y Ede, en 1970, investigaron la ebullición en película subenfriada en torno a cilindros horizontales de 3.2 y 6.4 mm, en agua subenfriada entre 0-80°C. Los autores correlacionaron sus datos experimentales por la ley de la adición, de forma similar a Harnill y Baumeister (1967), obteniendo la siguiente relación:

$$Nu_t = Nu_{sat} + JNu_r + Nu_{nc} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \quad (16)$$

donde  $Nu_{sat}$  es la componente convectiva de la ebullición en película para líquido saturado  $Nu_{sat} = h_{sat}D/k_v$ , J es una constante de valor 0.78 que deriva del acoplamiento convectivo-radiante por absorción de radiación en la película de vapor,  $Nu_r$  es la componente radiante si no existiese acoplamiento convectivo-radiante  $Nu_r = h_rD/k_v$ ,  $Nu_{nc}$  es la componente convectiva respecto al líquido subenfriado  $Nu_{nc} = h_{nc}D/k_l$ , y Sc y Sp son el subenfriamiento adimensional y el sobrecalentamiento adimensional, respectivamente, definidos como:

$$Sc = \frac{\Delta T_{sub} C_{p,l}}{h_{fg} Pr_l} \quad Sp = \frac{\Delta T_{sub} C_{p,v}}{h_{fg} Pr_v} \quad (17, 18)$$

Farahat, Eggen y Armstrong (1972, 1974 y 1975) estudiaron la ebullición en película en piscina en torno a esferas, con diámetros de 25.4, 19 y 12.7 mm, en sodio y agua subenfriados. Continuando el análisis de Harnill y Baumeister (1967), correlacionaron sus datos por:

$$Nu_t = Nu_{sat} + 0.88Nu_r + KNu_{nc} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)$$

$$Nu_{nc} = 0.75 (Gr Pr^n)^{1/4} \quad (19, 20, 21, 22)$$

$$K = 11.9 \Delta T_{sub}^{-0.7} \quad \text{para } D = 25.4 \text{ mm}$$

$$K = 18.8 \Delta T_{sub}^{-0.65} \quad \text{para } D = 13 - 19 \text{ mm}$$

donde  $Nu_{sat}$  se calcula por la correlación de Hendricks y Baumeister (1969). K es una función del subenfriamiento del líquido y del diámetro de la esfera, n es 1 para fluidos no metálicos y n es 2 para metales líquidos.

Dhir y Purohit en 1978 [7] realizaron experimentos con esferas de 19 y 25.4 mm de diámetro, ensayando con acero, cobre y plata como materiales, y con agua como fluido, a temperaturas en las que la transmisión de calor por radiación no era demasiado significativa. Estos investigadores encontraron que las propiedades del material de la esfera no afectaban al coeficiente convectivo de transferencia de calor, lo cual estaba de acuerdo con los argumentos de Bromley. Cuando correlacionaron sus datos de ebullición en película estando el líquido en condición de saturación, encontraron que la correlación de mejor ajuste era la siguiente:

$$Nu = 0.8 \left( \frac{Ar}{Sp} \right)^{1/4} \quad (23)$$

Como puede notarse, la constante es mucho más alta a la encontrada por Frederking y Clark (Ec. 9), lo que puede deberse a las siguientes razones: a) el tubo soporte de las esferas fue de 3 mm de diámetro, por lo que la pérdida de calor desde este tubo, en su comportamiento como aleta, podría ser una parte significativa del calor total; b) este experimento fue realizado a la temperatura mínima de ebullición en película (mínimo de Leidenfrost), por lo que la ebullición pudo operar parcialmente en el régimen de transición, que implica un mayor coeficiente convectivo de transferencia de calor. Por lo tanto, y como consecuencia de ambos efectos, sus datos experimentales pueden haber sobreestimado la transferencia de calor por ebullición en película desde esferas, por lo que la correspondiente constante de ajuste ( $C = 0.8$ ) puede ser demasiado alta para caracterizar el mecanismo de ebullición en película en piscina.

Estos mismos autores también aplicaron la ley de adición para correlacionar sus datos para ebullición en película en piscina con líquido subenfriado, obtenidos por enfriamiento transitorio. Concluyeron que el subenfriamiento del líquido afectaba fuertemente al coeficiente de transferencia de calor y desarrollaron la correlación que se presenta a continuación:

$$Nu_t = Nu_{sat} + \frac{Pr_v k_v}{C_{p,v} \mu_v} Nu_t + Nu_{nc} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \quad (24, 25, 26)$$

$$Nu_{sat} = 0.8 \left( \frac{Ar}{Sp} \right)^{1/4} \quad Nu_{nc} = 0.5 (Gr Pr_l)^{1/4}$$

Shih y El-Wakil (1981) llevaron a cabo un análisis para la ebullición en película en piscina con líquido subenfriado en torno a una esfera usando un método integral. Basándose en su análisis teórico, obtuvieron la siguiente correlación:

$$\frac{Nu}{Nu_{sat}} = 1 + 13.91 \left( \frac{Sc Ar}{Gr} \right)^{0.39} \quad (27)$$

Los autores de este trabajo hicieron énfasis en que en ebullición en película con subenfriamiento del líquido, es el cociente y no la diferencia entre los números de Nusselt total y saturado, lo que es significativo. Sus experimentos con esferas de acero inoxidable de 3.2, 4.8 y 6.4 mm de diámetro, sumergidas en Freon-11 y Freon-113, con 0-20°C de subenfriamiento, soportan su correlación.

En 1982, Grigoriew, Klimenko y Shelepen combinaron leyes de potencia  $1/4$  y  $1/3$ , para cuantificar el efecto diámetro y el efecto turbulento, en la ebullición en película en torno a esferas. Ellos usaron la ley de potencia  $1/4$  para ebullición en película laminar cuando el diámetro es pequeño y la ley de potencia  $1/3$  para ebullición en película turbulenta cuando el diámetro es grande. Su correlación establece lo siguiente:

$$Nu = 0.7 Ar^{1/4} Pr_v^{1/3} f_1(K) \quad \text{para } Ar < 3 \times 10^7$$

$$f_1(K) = \begin{cases} 1.0 & \text{si } K \leq 1.4 \\ 0.92 K^{1/4} & \text{si } K > 1.4 \end{cases} \quad (28)$$

$$Nu = 0.165 Ar^{1/3} Pr_v^{1/3} f_2(K) \quad \text{para } Ar \geq 3 \times 10^7$$

$$f_2(K) = \begin{cases} 1.0 & \text{si } K \leq 1.6 \\ 0.85 K^{1/3} & \text{si } K > 1.6 \end{cases} \quad (29)$$

$$K = \frac{h_{fg}}{C_{p,v} \Delta T_{sob}} \quad (30)$$

Los autores de este trabajo afirman que esta correlación se ajusta bien con datos de 11 grupos de investigación, que incluyen 5 líquidos y diferentes tamaños de esferas con diámetros entre 0.25 y 96 mm.

Michiyoshi, Takahashi y Kikuchi (1988) obtuvieron una correlación general para ebullición en película en piscina subenfriada, a través de un análisis con el método integral, aplicable a placas verticales, cilindros horizontales y esferas, la cual tiene la siguiente forma:

$$Nu = K \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} M_c^{1/4} \quad (31)$$

donde

$$M_c = \frac{E^3}{\left( 1 + \frac{E}{Sp' Pr_l} \right) (R Pr_l Sp')^2} \quad (32)$$

$$E = \left( A + C\sqrt{B} \right)^{1/3} + \left( A - C\sqrt{B} \right)^{1/3} + \frac{1}{3} Sc_m \quad (33)$$

$$A = \frac{1}{27} Sc_m^3 + \frac{1}{3} R^2 Sp' Pr_l Sc_m + \frac{1}{4} R^2 Sp'^2 Pr_l^2 \quad (34)$$

$$B = -\frac{4}{27} Sc_m^2 + \frac{2}{3} Sp' Pr_l Sc_m - \frac{32}{27} Sp' Pr_l R^2 + \frac{1}{4} Sp'^2 Pr_l^2 + \frac{2}{27} \frac{Sc_m^3}{R^2} \quad (35)$$

$$C = \frac{1}{2} R^2 Sp' Pr_f \quad Sc_m = \frac{C_{p,l} \Delta T_{sub}}{h'_{fg}} \quad (36, 37)$$

siendo K igual a 0.696 para esferas, 0.610 para cilindros horizontales y 0.793 para placas verticales. Comparando esta correlación con sus propios datos para agua y potasio y otros datos de la literatura, concluyeron que es apropiada para caracterizar la ebullición en película en piscina en varios líquidos no metálicos, especialmente para el agua.

En 1990, Tso, Low y Ng presentaron una derivación detallada de la correlación de Michiyoshi (1990) para el caso de esferas y compararon sus datos experimentales, obtenidos para enfriamientos transitorios de esferas de cobre de 20 y 25 mm de diámetro, sumergidas en Freon-12, analizando un rango de subenfriamiento de 0 a 70°C. Sus datos experimentales sobre el coeficiente de transferencia de calor resultaron superiores en un 50% a los predichos por su correlación.

Sakurai, Shiotsu y Hata en 1990 [8] desarrollaron una correlación general para la ebullición en película en piscina en torno a cilindros horizontales, incluyendo las contribuciones del subenfriamiento del líquido y de la radiación desde el cilindro, para amplios rangos de condiciones y para varias clases de líquidos. Estos líquidos incluyen aquellos con bajo calor latente, como son los freones, y aquellos con números de Prandtl bastante más altos o más bajos que la unidad, como los alcoholes y los metales líquidos, respectivamente. En la primera parte de su trabajo obtuvieron la solución numérica rigurosa de un modelo teórico basado en la teoría de la capa límite laminar. La aplicabilidad de esta solución es confirmada, comparándola con datos experimentales. Además, también desarrollaron una solución analítica aproximada para el modelo teórico, que describe muy bien la solución rigurosa y que es la misma obtenida por Michiyoshi (1990). Al comparar ambas soluciones con datos experimentales para el agua en un amplio rango de subenfriamiento, encontraron muy buena concordancia para diámetros adimensionales ( $D/L=D^*$ ) alrededor de 1.3, pero observaron discrepancias importantes para valores menores y mayores a 1.3.

Estos autores condujeron este mismo año un experimento sistemático con cilindros de platino calentados eléctricamente y con varios líquidos, incluyendo agua, etanol, isopropanol, Freon-113, Freon-11, nitrógeno y argón. [9]. El experimento fue llevado a cabo en un amplio rango de presiones, subenfriamiento del líquido, temperatura superficial y diámetro del cilindro. Basados en sus experimentos, modificaron su solución analítica introduciendo una función empírica dependiente del diámetro adimensional  $K(D^*)$  en la parte derecha de la correlación y un factor  $(1+2/Nu)^{-1}$  en el lado izquierdo, la cual es efectiva solamente cuando  $Nu$  es muy pequeño. La correlación, la cual concuerda con una amplia base de datos experimentales dentro de  $\pm 10\%$ , está dada como:

$$\frac{Nu}{1 + \frac{2}{Nu}} = K(D^*) \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} M_c^{1/4} \quad (38)$$

donde

$$\begin{aligned} K(D^*) &= 0.44 D^{*-1/4} && \text{para } D^* < 0.14 \\ K(D^*) &= \frac{0.75}{1 + 0.28 D^*} && \text{para } 0.14 \leq D^* < 1.25 \\ K(D^*) &= \frac{2.1 D^*}{1 + 3 D^*} && \text{para } 1.25 \leq D^* \leq 6.6 \\ K(D^*) &= 0.415 D^{*1/4} && \text{para } D^* > 6.6 \end{aligned} \quad (39)$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser reemplazadas por una ecuación simple para el rango completo de  $D^*$  de la forma siguiente:

$$K(D^*) = 0.57 - 0.041(\log_{10} D^*) + 0.19(\log_{10} D^*)^2 \quad (40)$$

$Mc$  se determina de la misma manera que en la ecuación de Michiyoshi, con la excepción que  $Sc_m$  debe reemplazarse por  $Sc^*$ , el cual se evalúa así:

$$Sc^* = \frac{K C_{p,l} \Delta T_{sub}}{h'_{fg}} \quad (41)$$

$$K = \left( 0.93 Pr_f^{0.22} + 3e^{-100 Sp' Pr_f Sc_m^{-0.5}} \right) \frac{0.45 \times 10^5 Pr_f Sc_m}{1 + 0.45 \times 10^5 Pr_f Sc_m} \quad (42)$$

Para líquidos diferentes a los metales líquidos, la ecuación anterior puede simplificarse como:

$$K = 0.93 Pr_f^{0.22} \quad (43)$$

Además en este trabajo los autores compararon su correlación con la de Siviour y Ede (1970) para condiciones subenfriadas, y con las de Bromley (1950) y Breen y Westwater (1962) para condiciones saturadas, usando siempre gran diversidad de condiciones. De esta forma señalan que los valores de la correlación de Siviour y Ede para un determinado diámetro adimensional, varían significativamente dependiendo de la clase de líquido y la presión del sistema, siendo su desviación bastante mayor al  $\pm 10\%$  que presenta la correlación propuesta. Por otra parte, en relación a la correlación de Bromley, sus resultados, excepto los correspondientes al helio, presentan una desviación de  $\pm 10\%$  en comparación con la correlación general propuesta, pero para un rango limitado de diámetro adimensional comprendido entre 0.6 y 15. Finalmente, en relación a los valores obtenidos con la correlación de Breen y Westwater, puede indicarse que son considerablemente más altos para valores de diámetros adimensionales menores que 1, llegando incluso a ser hasta el doble. Para diámetros adimensionales mayores que 1, los valores son aproximadamente un 20% más altos que los de la correlación general, con la excepción del helio.

En 1994, Liu y Theofanous [10] estudiaron teórica y experimentalmente la ebullición en película en torno a esferas, no solo en piscina, sino también con convección forzada, con la intención de establecer una correlación general. Para ello llevaron a cabo experimentos sistemáticos para determinar el efecto del subenfriamiento del líquido (0-40°C), el del sobrecalentamiento de la esfera (200 a 900°C), el del diámetro de la esfera (6 a 19 mm), el de la velocidad del fluido (0 a 2 m/s), y el del material de la esfera (acero inoxidable y bronce), sobre el coeficiente de transferencia de calor. Estos datos experimentales fueron comparados con los obtenidos con correlaciones existentes, observándose que eran 8% más altos que los de la correlación de Michiyoshi y 10-14% más altos que los de la correlación de Sakurai para cilindros. Comparada con la correlación de Dhir, sus datos eran un poco menores para bajos niveles de subenfriamiento y un poco más altos para grandes subenfriamientos. Ellos indicaron que la ebullición en película en torno a esferas y a cilindros es similar, por lo que el factor de corrección por el efecto diámetro,  $K(D^*)$ , planteado por Sakurai en sus estudios con cilindros, también debe aplicar para el caso de esferas. Apoyándose en la comparación de sus datos con la correlación de Sakurai y en la afirmación del trabajo de Michiyoshi de que el número de Nusselt para esferas es 14% más alto que para cilindros, los autores aplicaron un factor 1.14 al parámetro  $K(D^*)$  de la correlación de Sakurai, obteniéndose lo siguiente:

$$\begin{aligned} K(D^*) &= 0.5D^{*-1/4} && \text{para } D^* < 0.14 \\ K(D^*) &= \frac{0.86}{1+0.28D^*} && \text{para } 0.14 \leq D^* < 1.25 \\ K(D^*) &= \frac{2.4D^*}{1+3D^*} && \text{para } 1.25 \leq D^* \leq 6.6 \\ K(D^*) &= 0.47D^{*1/4} && \text{para } D^* > 6.6 \end{aligned} \quad (44)$$

De esta forma, se obtuvo muy buena concordancia dentro de una banda de  $\pm 15\%$  con los datos experimentales.

Tou y Tso en 1997 [11] presentaron una solución analítica cerrada para la ebullición en película en torno a una esfera siguiendo la aproximación clásica de Frederking y Clark, pero usando coordenadas esféricas en vez de cartesianas, lo que permite mejorarla. La correlación resultante fue la siguiente:

$$Nu = C_1 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^n + C_2 \quad (45)$$

donde  $0.586 < C_1 < 0.828$ ,  $n = 1/4$  y  $C_2 = 2$

Este modelo muestra claramente que el número de Nusselt tiende a 2, y no a cero, cuando el número de Arquímedes tiende a cero. Los autores sugieren correlacionar datos experimentales de manera consistente utilizando su ecuación.

## COMPARACIÓN DE LAS CORRELACIONES

En la figura 1, elaborada por UNET-UPM, se puede observar la comparación de varias de las más importantes correlaciones para esferas, agua saturada, 600°C de sobrecalentamiento y 1 atm de presión. Las correlaciones de Dhir, Grigoriev y Frederking (teórica) estiman valores del número de Nusselt muy parecidos e inferiores a los estimados por las demás correlaciones. La correlación que estima los valores más altos del número de Nusselt es la de Dhir, para diámetros menores a 40 mm, y la de Theofanous para diámetros mayores a 40 mm. Por ejemplo, para una esfera de 60 mm, tomando como referencia la correlación de Frederking (teórica), Theofanous, Frederking (empírica) y Dhir estiman valores del número de Nusselt más altos, en 53%, 44% y 35%, respectivamente.



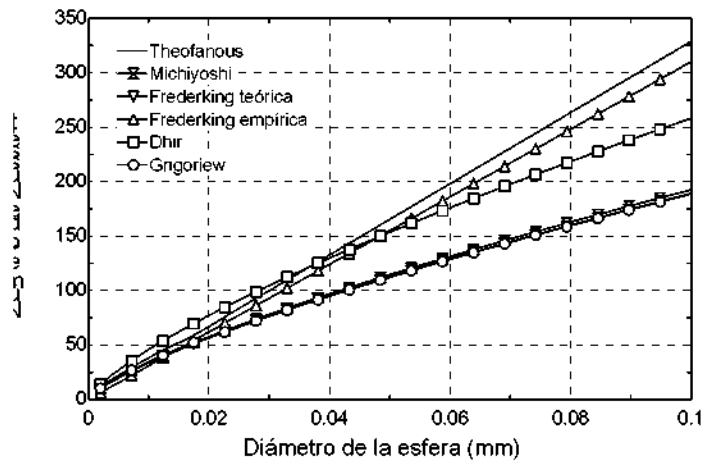


Figura 1. Comparación de algunas correlaciones para ebullición en película en torno a esferas, agua saturada, presión de 1 atmósfera y 600°C de sobrecalentamiento.

### ACOPLAMIENTO CONVECTIVO-RADIANTE

A elevadas temperaturas de la superficie calefactora, la transferencia de calor por radiación a través de la película de vapor puede llegar a ser significativa, e incluso importante. Una parte pequeña de la radiación intercambiada por la superficie calefactora es absorbida en la película de vapor, por tratarse de un gas semitransparente, participativo en el mecanismo radiante, que interacciona con la radiación mediante los mecanismos de absorción, transmisión y emisión, no presentando reflexión por no ser una superficie sólida; en consecuencia, la absorción de radiación en el vapor lo calienta y dilata, incrementando el espesor de la película. La radiación térmica restante llega a la interfase vapor-líquido y, en general, especialmente para temperaturas de la superficie calefactora inferiores a 1.000 °C, es absorbida en una fina capa líquido, por lo que su aporte térmico se emplea en producir más vapor que pasa a incrementar nuevamente el espesor de la película. De lo expuesto se puede concluir que la contribución puramente convectiva, que sería la única a considerar en caso de ebullición con baja temperatura de la superficie calefactora, se ve afectada por la existencia de radiación. Por ello no es razonable asumir que los procesos convectivo y radiante sean simplemente aditivos, sino que presentan un acoplamiento lo que implicará un tratamiento combinado del coeficiente puramente convectivo con el puramente radiante para determinar el coeficiente total convectivo-radiante de transferencia de calor. En la figura 2, elaborada por UNET-UPM, se evalúan, para un caso particular, los coeficientes de transferencia de calor convectivo (correlación de Liu y Theofanous) y radiante. Puede observarse que para bajos sobrecalentamientos el coeficiente radiante es prácticamente despreciable frente al convectivo, que viene a convertirse en el total, pero debido a su gran crecimiento, a temperaturas puede llegar a ser significativamente mayor que el convectivo.

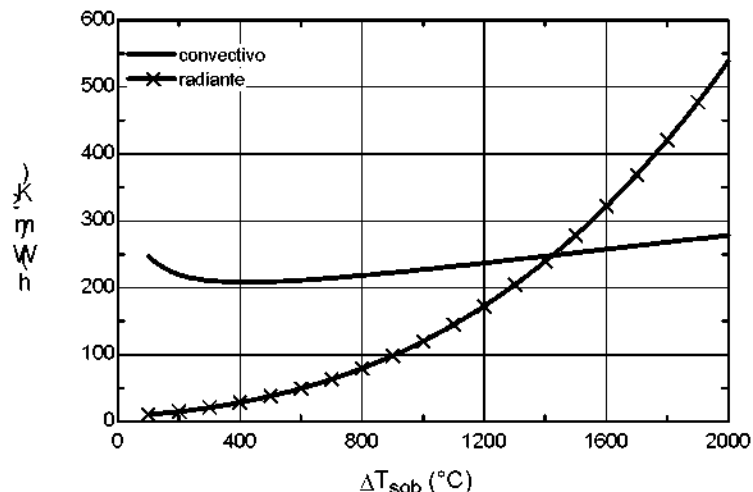


Figura 2. Coeficientes de transferencia de calor convectivo y radiante para ebullición en película en torno a una esfera de 9.53 mm de diámetro, emisividad 0.6 y agua saturada como fluido en ebullición.

Respecto al acoplamiento citado, en 1950 Bromley [4] realizó un análisis para el caso de ebullición en película en piscina en torno a cilindros horizontales y obtuvo la siguiente ecuación para acoplar los efectos convectivo y radiante:

$$h = h_c \left( \frac{h_c}{h_r} \right)^{1/3} + h_r \quad (46)$$

El autor también indicó que cuando  $h_r$  es mucho más pequeño que  $h_c$ , se obtienen muy buenos resultados, con una precisión del 5%, con la siguiente ecuación más simple:

$$h = h_c + \frac{3}{4} h_r \quad (47)$$

Así mismo, también sugiere el autor que para  $h_r$  muy grandes, cuando  $h_r/h_c > 10$ , se emplee la siguiente expresión:

$$h = h_c + h_r \left( 0.75 + \frac{0.25}{2.62 \frac{h_c}{h_r} + 1} \right) \quad (48)$$

En 1967, Hamill y Baumeister [5] estudiaron teóricamente el efecto del subenfriamiento y la radiación en la ebullición en película sobre placas planas y obtuvieron la siguiente expresión para el acoplamiento de estos factores:

$$h = h_c + 0.88 h_r \quad (49)$$

donde  $h_c$  se determina como:

$$h_c = h_{sat} + 0.12 h_{sub} \theta \quad (50)$$

siendo  $h_{sat}$  el coeficiente de transferencia de calor para ebullición en película para condiciones de saturación,  $h_{sub}$  el coeficiente de transferencia de calor para el líquido subenfriado (convección libre) y  $\theta$  un parámetro que mide la relación entre el subenfriamiento del líquido y el sobrecalentamiento del vapor y se determina como  $\Delta T_{sub}/\Delta T_{sob}$ . Los autores indican que esta expresión es válida cuando:

$$\left| \frac{h_r - h_{sub} \theta}{h_{sat}} \right| < \frac{1}{2} \quad (51)$$

Sin embargo, ningún tipo de datos experimentales fueron provistos en soporte de esta expresión.

Sakurai, Shiotsu y Hata en 1990 [8], elaboraron una solución numérica rigurosa para ebullición en película en piscina con subenfriamiento. Comparando los resultados con y sin radiación, sugirieron que el efecto radiante puede ser considerado de la siguiente forma:

$$h = h_c + J h_r \quad (52)$$

donde  $J$  es un factor inferior a la unidad, que se determina como se indica a continuación:

$$J = F + \frac{1 - F}{1 + 1.4 \frac{h_c}{h_r}} \quad (53)$$

$$F = (1 - 0.25 e^{-0.13 Sp}) e^{-0.64 R^{0.6} Pr^{0.62} Sp^{-0.73} Sc^{1.1}} \quad (54)$$

En 2003, Dombrovskii [12] plantea la necesidad de obtener modelos teóricos más sustanciados y exactos para cuantificar la transferencia de calor por radiación a través de películas de vapor, ya que los existentes hasta esa fecha eran modelos simplificados que despreciaban las propiedades ópticas espectrales del líquido en ebullición y los efectos de ondulamiento de la película de vapor. En su trabajo, el autor calcula la transferencia de calor por radiación bajo condiciones de ebullición en película de agua sobre superficies planas horizontales calientes de metales refractarios y óxidos fundidos, materiales caracterizados por el alto valor de su emisividad, próxima a la del cuerpo negro, mostrando que los efectos de ondulamiento de la película de vapor causan un incremento significativo en el flujo de radiación térmica, sobre todo para capas de vapor muy delgadas, por incrementar el tamaño relativo del recinto (la interfase ondulada) respecto al elemento calefactor.

Además, concluye que la distribución de potencia de radiación absorbida a través de la capa de agua depende de manera importante de la temperatura de la superficie calefactora: a medida que esta temperatura se incrementa, el flujo radiante es mayor, penetrando más en el seno del líquido, por lo que la fracción de radiación térmica absorbida en la capa de líquido inmediata a la interfase se reduce de forma relativa respecto al total. Entre las conclusiones de este trabajo, puede resaltarse que si se tiene una superficie calefactora de tungsteno a una temperatura de 2000 K en torno a la cual está ocurriendo ebullición en película, una capa de líquido de 4 mm de espesor será capaz de absorber junto a la interfase el 80% de la radiación neta transferida desde la superficie.

En la figura 3 puede apreciarse la comparación realizada por UNET-UPM de algunos de los modelos de acoplamiento convectivo-radiante, notándose que las diferencias surgen, como es razonable, para altos sobrecalentamientos de la superficie calefactora. Tanto para condiciones saturadas como subenfriadas, ambos modelos de Bromley predicen valores inferiores al de Sakurai para el coeficiente total de transferencia de calor por ebullición. Por ejemplo, para 2000°C de sobrecalentamiento en la superficie, y líquido saturado, los modelos de Bromley arrojan valores de 12% (el simple) y 4.7% más bajos que el de Sakurai. Para igual temperatura de la superficie y 80°C de subenfriamiento del líquido estos porcentajes se transforman en 10% y 4.3%.

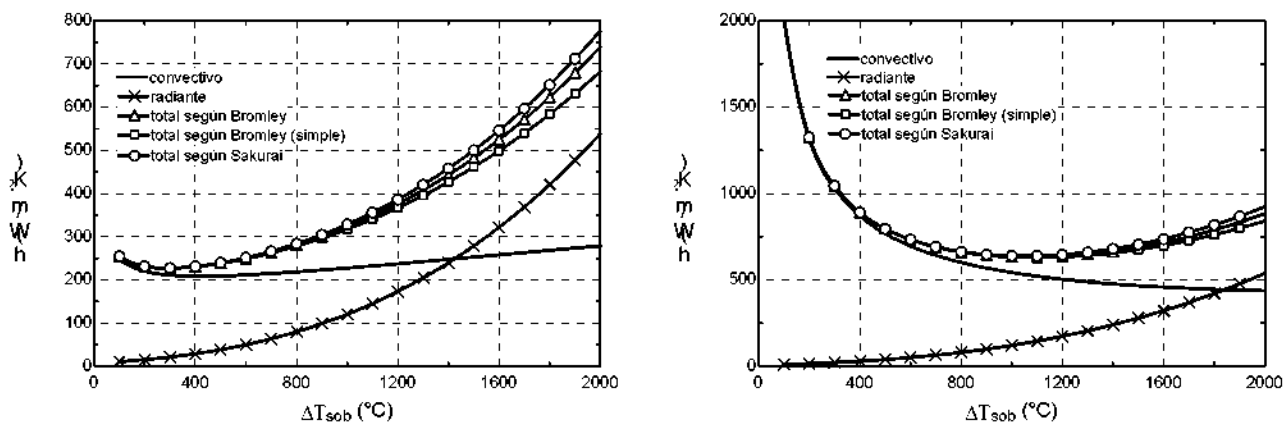


Figura 3. Coeficientes de transferencia de calor convectivo, radiante y total para ebullición en película saturada (izquierda) y subenfriada 80°C (derecha) en torno a una esfera de 9.53 mm de diámetro y con una emisividad superficial de 0.6.

## CONCLUSIONES

Aunque existen numerosas correlaciones para la evaluación del coeficiente de transferencia de calor por ebullición en película en piscina, tanto teóricas como empíricas o semiempíricas, se observa que las correlaciones netamente teóricas no suministran resultados satisfactorios, salvo para condiciones muy limitadas. Casos puntuales que pueden nombrarse son las correlaciones de Bromley, válida solo para cilindros de ciertos diámetros, y la de Frederking y Clark, quienes se percataron de que su correlación teórica estaba muy alejada de sus resultados experimentales y se vieron obligados a plantear una nueva correlación completamente empírica. Son los modelos semiempíricos, es decir modelos teóricos que han sido ajustados en base a observaciones experimentales, los que han dado mejores resultados, con todo y los problemas que esto envuelve, es decir, son válidas sólo en el ámbito de la naturaleza de los datos experimentales que han sido utilizados en su desarrollo.

Por otra parte, puede decirse que, si bien a temperaturas superficiales bajas el componente radiante es despreciable en la ebullición en película, puede observarse que debido a su gran crecimiento con la temperatura, es sumamente importante darle un tratamiento correcto, ya que puede llegar a igualar e incluso superar al componente convectivo. En cuanto a los distintos modelos que permiten acoplar los efectos convectivo y radiante, sólo a temperaturas superficiales muy altas pueden notarse diferencias de cierta importancia entre ellos, observándose las carencias del modelo simplificado de Bromley, frente a la buena predicción de su modelo completo, generado en 1950, próximo en precisión a la de los más avanzados de que se dispone actualmente. Dada la importancia del componente radiante a muy altas temperaturas de la superficie, condición que se presenta en ciertas aplicaciones tecnológicas de vanguardia, como son los análisis de seguridad de los reactores nucleares, y que los modelos existentes han sido desarrollados en base a una serie de simplificaciones que les restan precisión, en los últimos años se han sugerido nuevos modelos que toman en cuenta el análisis detallado de la geometría de la interfase líquido-vapor, así como la adecuada caracterización de las propiedades radiantes espectrales del vapor sobrecalentado y del líquido saturado o subenfriado, en ebullición, frente a la radiación infra-roja proveniente de la superficie calefactora. líneas temáticas en que se centra la investigación que actualmente desarrolla UNET-UPM.

## REFERENCIAS

1. L.D. Clements y C.P. Colver, Natural Convection Film Boiling Heat Transfer, Industrial and Engineering Chemistry, Volumen 62, No. 9, pp. 26-46, 1970.
2. J. Walker, Boiling and the Leidenfrost Effect, Cleveland State University, pp. 1-4, 1994.
3. S. Nukiyama, The Maximum and Minimum Values of the Heat  $Q$  Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure, J. Japan Soc. Mech. Engrs, Volumen 31, pp. 367-374, 1934.

4. L.A. Bromley, Chemical Engineering Progress, Volumen 46, No. 5, pp. 221-227, 1950.
5. T.D. Hamill y K.J. Baumeister, Effect of Subcooling and Radiation on Film-Boiling Heat Transfer from a Flat Plate, NASA Technical Note, pp. 1-39, 1967.
6. R.C. Hendricks y K.J. Baumeister, Film Boiling from Submerged Spheres, NASA Technical Note, pp. 1-63, 1969.
7. V.K. Dhir y G.P. Purohit, Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres, University of California, Nuclear Engineering and Design, Volumen 47, pp. 49-66, 1978.
8. A. Sakurai, M. Shiotsu y K. Hata, A General Correlation for Pool Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Cylinder to Subcooled Liquid: Part 2 – Experimental Data for Various Liquids and its Correlation, Journal of Heat Transfer, Volumen 112, pp. 441-450, 1990.
9. A. Sakurai, M. Shiotsu y K. Hata, A General Correlation for Pool Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Cylinder to Subcooled Liquid: Part 1 – A Theoretical Pool Film Boiling Heat Transfer Model Including Radiation Contributions and its Analytical Solution, Journal of Heat Transfer, Volumen 112, pp. 430-440, 1990.
10. C. Liu y T.G. Theofanous, Film Boiling on Spheres in Single and Two Phase Flows, University of California, pp. 1-259, 1994.
11. S.K.W. Thou y C.P. Tso, Improvement on the Modelling of Film Boiling on Spheres, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Volumen 24, No. 6, pp. 879-888, 1997.
12. L.A. Dombrovskii, Heat Transfer by Radiation through a Vapor Gap under Conditions of Film Boiling of Liquid, Heat and Mass Transfer and Physical Gasdynamics, Volumen 41, No. 6, pp. 819-824, 2003.

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

Ar	Número de Arquímedes (adimensional)
Bo	Número de Bond (adimensional)
c	Convección
C <sub>p</sub>	Calor específico (J/kgK)
D	Diámetro (m)
D*	Parámetro que representa el diámetro (adimensional)
g	Aceleración de gravedad (m/s <sup>2</sup> )
Gr	Número de Grashof (adimensional)
h	Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)
h <sub>ig</sub>	Entalpía de vaporización (J/kg)
h <sup>*</sup> <sub>ig</sub>	Entalpía de vaporización modificada (J/kg)
k	Conductividad térmica
l	Líquido
L	Longitud característica del domo de la película de vapor (m)
nc	Convección natural
Nu	Número de Nusselt (adimensional)
Pr	Número de Prandtl (adimensional)
r	Radiación
s	Superficie
sat	Saturación
Sc, Sc <sub>m</sub> , Sc*	Parámetro que representa el subenfriamiento (adimensional)
Sp, Sp <sup>*</sup>	Parámetro que representa el sobrecalentamiento (adimensional)
t	Total
T	Temperatura (K)
v	Vapor
λ <sub>c</sub>	Longitud de onda crítica (m)
μ	Viscosidad absoluta (kg/ms)
ρ	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
σ	Tensión superficial (N/m)
ν	Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)
ΔT <sub>sob</sub>	Sobrecalentamiento (K)
ΔT <sub>sub</sub>	Subenfriamiento (K)